

Article

« Datation par les méthodes de luminescence des feldspaths des milieux sédimentaires : le problème de la remise à zéro »

Michel Lamothe

Géographie physique et Quaternaire, vol. 50, n° 3, 1996, p. 365-376.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/033106ar>

DOI: 10.7202/033106ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

DATATION PAR LES MÉTHODES DE LUMINESCENCE DES FELDSPATHS DES MILIEUX SÉDIMENTAIRES : LE PROBLÈME DE LA REMISE À ZÉRO

Michel LAMOTHE*, Laboratoire de Luminescence LUX, Département des sciences de la Terre, GÉOTERAP, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succursale Centre-ville, Montréal, Québec H3C 3P8.

RÉSUMÉ La luminescence latente post-sédimentaire de grains minéraux croît avec le temps, ce qui en fait une méthode géochronologique bien adaptée à la datation des milieux récents. La difficulté de démontrer que le sédiment à dater a été effectivement remis à zéro avant ou lors de la sédimentation, limite son application universelle. Dans le cas d'un sédiment mal remis à zéro, la croissance du signal de luminescence lors de la mesure de la paléodose est dominée par celle des grains non remis à zéro, et l'âge ainsi obtenu est surestimé. Afin de solutionner ce problème, un nouveau paramètre de laboratoire est mis en lumière à partir de l'analyse de grains monominéraliques. Le rapport de l'intensité de luminescence accrue par une dose de radiation artificielle sur celle de l'intensité naturelle ($R_f = L_{N_{\text{art}}} / L_N$) permet l'étude du bilan de la luminescence d'un échantillon. Les valeurs R_f obtenues à partir de trois échantillons provenant de sédiments d'âge équivalent indiquent que la technique employée pourra servir d'indicateur de l'efficacité de la remise à zéro. Une deuxième application de l'analyse monograin permet la datation de minéraux individuels. Cette méthode a été appliquée à des sédiments de la Mer de Champlain datant d'environ 10 ka et pour lesquels les âges apparents de luminescence étaient originellement de 65 ka. La distribution des âges obtenus sur 15 grains individuels montre que seulement six de ces grains semblent avoir été bien remis à zéro, révélant des âges apparemment sous-estimés de l'ordre de 6 ka. Les facteurs pouvant expliquer ces sous-estimations sont d'ordre méthodologique (changement de sensibilité) ou physique (*anomalous fading*).

ABSTRACT *Luminescence dating of feldspar in sedimentary environments: The problem of zeroing.* Postdepositional latent luminescence of mineral grains buried in sediments increases with time, which makes the luminescence dating method particularly suitable for the dating of recent environments. The difficulty one has to demonstrate that the sediment has been fully zeroed before burial is still limiting its universal application. In the case of a poorly bleached sediment, the intensity of luminescence in the course of a paleodose measurement will be dominated by luminescence emitted by the unbleached grains and the age obtained will be overestimated. In order to solve this problem, a new method is being developed which is based on measurements of single grains. The ratio of the accrued luminescence intensity upon added dose over the natural component ($R_f = L_{N_{\text{art}}} / L_N$) for single grains reflects the individual contribution to total luminescence from the discrete grains. Measurements carried out on three sediments of different depositional origin but of similar age suggest this parameter may eventually be used to assess the degree of zeroing for a sediment. A second application of the single grain approach allows the dating of individual minerals. This method has been applied to a sediment deposited in the lateglacial Champlain Sea (10 ka old) for which apparent luminescence ages of ca. 65 ka had been obtained. The distribution of ages obtained from the analysis of 15 grains reveals that only six of those grains have been properly bleached, with a mean apparent age of 6 ka. This underestimation of age may be caused by methodological (change of sensitivity) and/or physical (*anomalous fading*) factors.

ZUSAMMENFASSUNG *Datierung mittels der Methoden der Lumineszenz der Feldspate der Sedimentumgebungen: Das Problem des Zurückstellens auf Null.* Die latente post-sedimentäre Lumineszenz mineralischer Körner nimmt mit der Zeit zu, was sie zu einer gut geeigneten geochronologischen Datierungsmethode der gegenwärtigen Umgebungen macht. Die Schwierigkeit nachzuweisen, daß das zu datierende Sediment tatsächlich vor oder während der Sedimentierung auf Null zurückgestellt wurde, schränkt ihre universale Anwendung ein. Ist das Sediment schlecht auf Null zurückgestellt, wird die Zunahme des Lumineszenzsignals bei der Messung der Paläodosis von den nicht auf Null zurückgestellten Körnern dominiert, und das so erhaltene Alter ist überschätzt. Um dies Problem zu lösen, wird eine neue Methode auf der Basis der Messung monomineralischer Körner vorgestellt. Das Verhältnis von der durch eine Dosis künstlicher Bestrahlung verstärkten Lumineszenzintensität zur natürlichen Intensität ($R_f = L_{N_{\text{art}}} / L_N$) erlaubt die Untersuchung der Lumineszenzbilanz einer Probe. Die mittels drei Proben von Sedimenten gleichen Alters gewonnenen R_f -Werte zeigen, daß die angewandte Methode als Indikator für die erfolgreiche Zurückstellung auf Null verwendet werden kann. Eine zweite Anwendung der Monokorn-Analyse ermöglicht die Datierung einzelner Minerale. Diese Methode hat man auf Sedimente vom Champlain-Meer angewandt, die etwa 10 ka alt sind und deren offenbare Lumineszenz-Alter ursprünglich 65 ka waren. Die Verteilung der auf 15 einzelnen Körnern erhaltenen Alter zeigt, daß nur sechs von den Körnern richtig auf Null zurückgestellt zu sein scheinen, was zu offenbar um 6 ka unterschätzten Altern führte. Die Faktoren, die diese Unterschätzungen erklären können, sind methodologischer (Veränderung der Sensibilität) oder physikalischer Art (*anomalies Verblässen*).

INTRODUCTION

L'âge des séquences quaternaires continentales représente une donnée fondamentale de la stratigraphie terrestre. Ceci est particulièrement vrai dans l'hémisphère boréal, lieu privilégié de l'expansion des inlandis au Cénozoïque supérieur. Dans la fourchette temporelle du dernier million d'années, la méthode du radiocarbone représente une technique fiable pour dater les événements plus récents que 40 ka, à condition bien sûr, que les sédiments associés livrent une quantité minimale de matériel organique ou des carbonates biogéniques. Au-delà de cette limite, et pour l'ensemble des sédiments sans matériel datable, des méthodes dites alternatives ont été élaborées. La méthode la plus prometteuse pour la datation de sédiments détritiques et dans lesquels des minéraux tels que le quartz et le feldspath sont abondants est la méthode de la luminescence. Elle s'appuie sur le principe selon lequel la luminescence latente postsédimentaire des grains minéraux hérités de l'érosion et du transport sédimentaire croît avec le temps. Le développement de la méthode est en pleine expansion et de nombreux résultats positifs ont déjà été publiés pour des sédiments dont la remise à zéro ne fait aucun doute, tels les sédiments éoliens (Wintle, 1993).

Bien que les principes modernes de la méthode aient été élaborés depuis 1979 (Wintle et Huntley, 1979), et malgré un raffinement important survenu en 1985 par l'utilisation de la lumière comme mécanisme de stimulation de la luminescence (Huntley *et al.*, 1985), deux phénomènes apparaissent encore aujourd'hui comme des obstacles majeurs à son application universelle. Ces problèmes sont (1) la difficulté de démontrer que le sédiment à dater a été effectivement remis à zéro avant ou lors de la sédimentation (Berger, 1988) et (2) l'impossibilité apparente d'obtenir des âges supérieurs à 100 ka pour des échantillons de grains fins polyminéraliques (Debenham, 1985 ; Li et Wintle, 1992 ; Berger, 1994).

Plusieurs chercheurs, en particulier d'Europe, soutiennent que des loess dont l'âge précède le dernier interglaciaire ne peuvent être datés, le meilleur exemple étant les loess de la coupe de Achenheim (Spooner et Questiaux, 1989). Plus près de nous, Berger et Eyles (1994) ont publié des âges TL d'environ 70-80 ka sur grains fins pour les sédiments de la Formation de Don, dans la région de Toronto, dont le caractère d'optimum interglaciaire ne fait aucun doute. D'autre part, des résultats récents obtenus sur grains grossiers feldspathiques par Balescu et Lamothe (1994), pour des sédiments littoraux interglaciaires et Duller (1992) pour des sédiments éoliens, semblent démontrer que la barrière des 100 ka peut être franchie. Ce problème très complexe lié à la limite supérieure chronologique de la méthode de la luminescence fera l'objet d'un prochain article.

Le problème de la remise à zéro est particulièrement aigu pour les sédiments mis en place dans des milieux à taux de sédimentation rapide. Bien que de nombreux laboratoires aient eu à mesurer des échantillons pour lesquels le problème se pose de façon particulière, très peu de ces résultats ont été publiés. Dans le domaine de la recherche géochronologique, la publication de résultats « négatifs » est difficile à

faire, et ce, pour des raisons qui tiennent surtout d'un certain syndrome scientifique selon lequel on encourage la littérature « positive » et non celle des résultats problématiques. Récemment, Balescu et Lamothe (1994) ont obtenu des résultats sur des grains grossiers de feldspaths potassiques isolés à partir de séquences non glaciaires du Canada et de l'Europe. Les âges obtenus semblent généralement correspondre à l'évaluation chronostratigraphique de ces sédiments, mais des âges apparents de l'ordre de 65 ka ont aussi été mesurés pour des sédiments mis en place dans le bassin tardiglaciaire de la Mer de Champlain, soit des surestimations de l'ordre de 500 % (échantillons SN et MCD de la fig. 1). Ces résultats démontrent que l'application universelle de la méthode de luminescence aux sédiments doit être subordonnée à la détermination de critères intrinsèques à l'échantillon afin d'établir si oui ou non l'échantillon a été suffisamment remis à zéro pour être datable par la méthode.

Cet article présente une approche nouvelle qui vise à mettre au point un protocole de laboratoire rigoureux qui permette de décrire le bilan de la luminescence d'un échantillon sédimentaire. Le modèle présenté ici a été élaboré au Laboratoire de luminescence LUX où, pour la première fois, des grains individuels (monograins) ont pu être datés par la méthode de photoluminescence (Lamothe *et al.*, 1994). L'application de cette méthode permet l'analyse d'un échantillon constitué de grains minéraux d'origines géologiques diverses. Nous présenterons successivement les principes de la méthode de photoluminescence, le concept de l'analyse monograin et un test de la méthode employée en utilisant des sédiments de la Mer de Champlain mal remis à zéro et un échantillon de sables éoliens provenant de la région du delta du Mackenzie. Nous renvoyons le lecteur aux travaux de Lamothe *et al.* (1994) et Balescu et Lamothe (1994) pour le détail des aspects méthodologiques (caractéristiques de la stimulation optique, fenêtre spectrale utilisée pour la détection de l'émission de luminescence, sources de radiation, etc.).

PRINCIPES DE LA PHOTOLUMINESCENCE

Les principes de la datation par photoluminescence de sédiments quaternaires ont été résumés dans des articles publiés par Huntley *et al.* (1985), Wintle (1993) et Aitken (1994). Les principes généraux du processus de la luminescence sont maintenant relativement bien connus. Cependant, certains détails touchant quelques aspects de physique de l'état solide sont présentés ici.

En milieu naturel, les minéraux sont des cristaux imparfaits dont la structure cristalline présente des défauts de nature intrinsèque et extrinsèque. Les défauts intrinsèques sont représentés par des ions interstitiels ou des « vacances » présents dans l'ensemble de la structure cristalline. Les défauts de nature extrinsèque apparaissent le long de dislocations ou sur des impuretés localisées à des sites spécifiques de la maille cristalline. Dans le domaine de la physique de l'état solide, la théorie des bandes est celle qui est couramment utilisée pour modéliser les transferts de charge qui, éventuellement, conduiront à la production de la luminescence observée (fig. 2).

Dans les structures cristallines des minéraux de l'écorce terrestre tels que le quartz et ceux de la famille des feldspaths, il existe des niveaux d'énergie représentés par la bande de valence et la bande de conduction, séparés par un « fossé » de quelques électronvolts (eV ; fig. 2a). La bande de valence représente un niveau énergétique correspondant à l'énergie maximale des charges dans les orbitales périphériques, dans l'ensemble de la maille cristalline. La bande de conduction correspond au niveau d'énergie permettant à des charges excitées (des électrons, dans le cas qui nous concerne) de « voyager » librement à l'intérieur du cristal. Entre ces deux niveaux d'énergie existent des états localisés dus à des interruptions de la périodicité de la maille. Ces états théoriquement « interdits » sont situés à l'emplacement des défauts décrits plus haut. C'est à ces sites, dits « discrets », que des charges libres pourront être piégées. À titre d'exemple, dans le cas des feldspaths, une substitution du Si^{+4} par un ion de Fe^{+3} entraînera un déséquilibre localisé du champ électrique. Ce site est déficitaire en charge positive et situé près de la bande de valence. À d'autres sites correspondent des déséquilibres électriques négatifs, comme le piège à électron du titane ($\text{Ti}^{+4} + 1\text{e}^- = \text{Ti}^{+3}$; Speit et Lehmann, 1982). Ces sites sont localisés près de la bande de conduction. Imaginons que le cristal considéré est bombardé par une particule alpha, d'origine nucléaire et dont l'énergie est de quelques MeV (fig. 2b). Cette particule, hautement énergétique, a la capacité de propulser des électrons

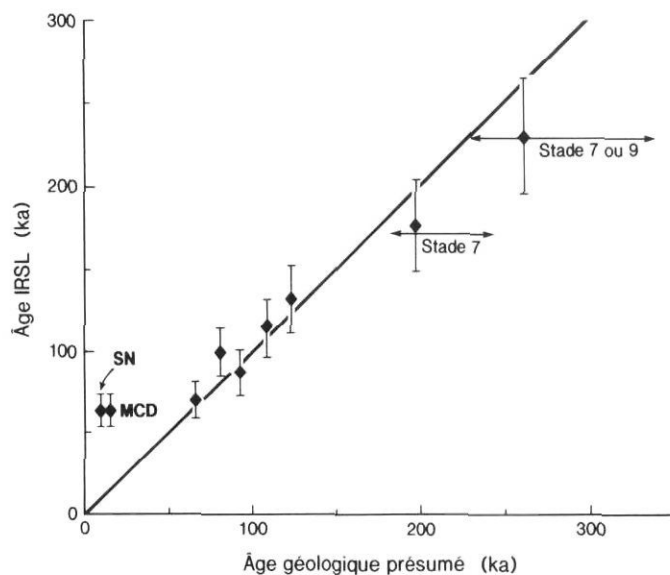


FIGURE 1. Les âges obtenus par photoluminescence en fonction de l'âge présumé pour un ensemble de sédiments lacustres, fluviaux et marins de l'est du Canada et de l'Europe occidentale (fig. modifiée de Balescu et Lamothe, 1994). Les échantillons SN et MCD proviennent de séquences sédimentaires de la Mer de Champlain, de la région de Saint-Nicolas et de Deschaillons. Les flèches horizontales reflètent l'incertitude de l'âge géologique.

Optical dates versus presumed ages for a series of lacustrine, fluvial, and marine sediment samples from Eastern Canada and Western Europe, modified from Balescu and Lamothe (1994). Samples SN and MCD are Champlain Sea sediments collected in the Saint-Nicolas and Deschaillons area. Horizontal arrows indicate uncertainties in geological age.

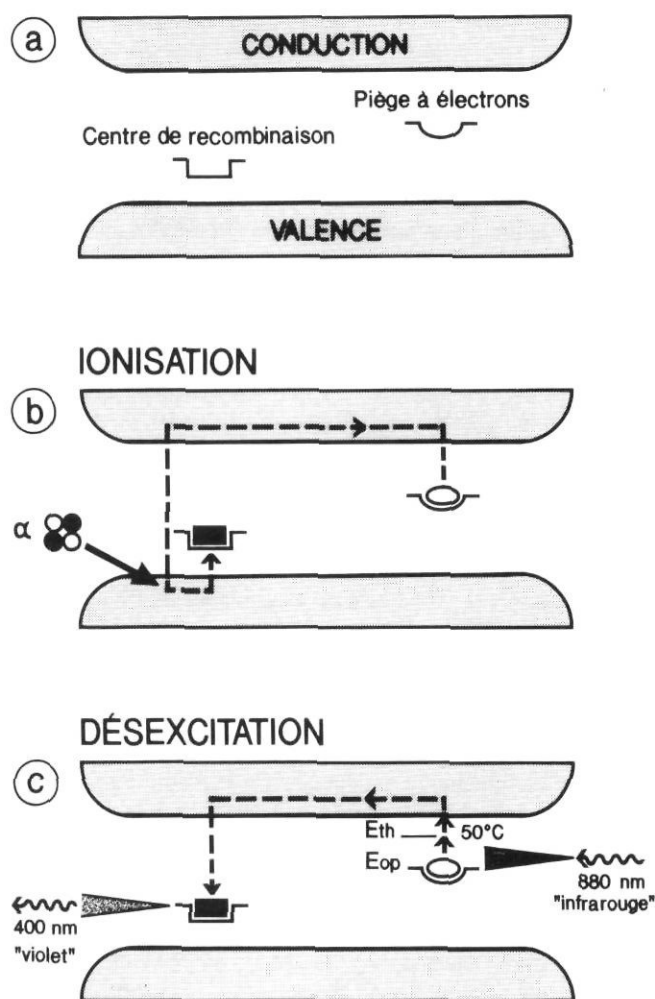


FIGURE 2. Le modèle des bandes en physique de l'état solide : a) un modèle simplifié montrant la position énergétique des bandes de valence et de conduction, ainsi qu'un piège à électrons et un centre de recombinaison ; b) l'ionisation provoque la formation d'une paire électron-trou, ces charges pouvant être piégées dans les deux sites localisés ; c) la désexcitation en laboratoire produite par le transfert énergétique du rayonnement infrarouge d'une énergie de l'ordre de 1,44 eV (E_{op}), accompagnée d'une excitation d'origine thermique de l'ordre de 0,2-0,3 eV (E_{th} à 50°C), libère l'électron qui, après un passage dans la bande de conduction, se recombine au centre luminescent, avec émission de rayonnement lumineux. La bande spectrale préférentiellement mesurée à notre laboratoire est de l'ordre de 400 nm, qui correspond à l'émission caractéristique des feldspaths potassiques.

The band model in solid state physics. a) A simplified model with the energy level for the valence and conduction band, one electron trap and a recombination centre. b) Ionisation induces an electron-hole pair, these charges could be trapped in the corresponding localized sites. c) In the laboratory, absorption of an infrared photon ($E_{op} \sim 1.44$ eV) coupled with a thermal energy component of $E_{th} \sim 0.2-0.3$ eV (at 50°C) detraps the electron which, after passing across the conduction band, recombines at the luminescent centre and emits a photon. The band spectrum measured in our laboratory is in the range of 400 nm, which corresponds to a characteristic emission for potassium feldspar.

à l'extérieur des orbitales périphériques. Une paire électron-« trou » est ainsi créée. Le « trou » est à toutes fins pratiques échangé entre éléments atomiques voisins jusqu'à sa stabilisation dans le piège déficitaire en charge positive (*hole trap*). L'électron excité sera piégé au site déficitaire en charge négative (*electron trap*). Précisons toutefois que l'immense majorité des charges créées lors d'une irradiation se recombinent presque immédiatement après avoir été générées.

Le processus décrit plus haut engendre, dans le cristal, deux familles de charges qui, lors de leur désexcitation, produiront la luminescence. Dans le modèle classique, les charges négatives, les électrons, sont localisées près de la bande de conduction (McKeever, 1985), et ce sont elles qui seront libérées lors d'une stimulation thermique, chimique, ou optique (fig. 2c). La lumière produite sera appelée alors thermoluminescence, chemiluminescence ou photoluminescence. L'éviction des électrons du piège dit de l'IRSL (*IRSL defect*, Spooner, 1994) se fait en deux étapes. Premièrement, l'absorption de l'énergie lumineuse infrarouge ($E_{\text{op}} = 1,44 \pm 0,01$ eV ; Spooner, 1993) excite l'électron qui pourra être complètement « dépiégé » et atteindre la bande de conduction grâce à l'ajout supplémentaire de phonons, c'est-à-dire d'énergie d'origine thermique de l'ordre de 0,2 à 0,3 eV (E_{th}). Dans ce modèle, les électrons libérés par la stimulation optique se recombinent avec des charges positives, localisées près de la bande de valence. L'annihilation de ces charges se fait à des centres de recombinaison qui pourront, dans une certaine proportion, être le lieu de production de lumière. Ces centres sont alors dits radiatifs. Certains centres de recombinaison sont non radiatifs (*killer centres*) et l'énergie libérée sera alors de nature thermique, avec production concomitante de phonons. En photoluminescence, la stimulation est généralement effectuée au moyen de sources lumineuses dont le spectre est monochromatique comme celui du laser à argon ($\lambda = 514$ nm) ou continu comme celui émis par des diodes infrarouges (c'est-à-dire proche-infrarouge, $\lambda \sim 880$ nm). Les abréviations utilisées pour identifier ces deux techniques sont : GLSL (*Green Light Stimulated Luminescence*) et IRSL (*Infrared Stimulated Luminescence*). Les mesures présentées ici ont été obtenues à partir d'une stimulation par infrarouge. L'émission, générée au niveau des centres de recombinaison, a un spectre plus complexe (Huntley *et al.*, 1988). Les feldspaths émettent dans plusieurs longueurs d'onde, la plus stable géologiquement parlant étant la bande spectrale de couleur bleu-violet (Balescu et Lamothe, 1992).

APPLICATION À LA DATATION

Les minéraux des milieux naturels pourront donc emmagasiner progressivement des charges stockées à l'intérieur des défauts de la structure cristalline. En pratique, ces minéraux sont des dosimètres naturels. La densité des charges piégées représente donc une variable proportionnelle à la radiation naturelle ambiante et au temps écoulé. La luminescence générée lors de la stimulation est aussi proportionnelle à la densité des charges piégées. La mesure du champ de radiation naturelle affectant le minéral (Dose annuelle, D_a) et de la dose totale reçue par le minéral depuis le dernier évé-

nement de remise à zéro (Paléodose, P) permet de déterminer l'âge du sédiment qui est égal au rapport de la paléodose sur la dose annuelle.

Le principe de la méthode de datation par luminescence est cependant fondé sur plusieurs postulats. Premièrement, l'état de la structure cristalline ne change pas au cours des temps géologiques. Deuxièmement, le débit de la radiation naturelle, dépendant par exemple de l'équilibre des chaînes radioactives, est constant. Troisièmement, les charges piégées sont complètement désexcitées lors de l'événement géologique ou archéologique qui marque la remise à zéro.

De nombreuses études ont démontré que les deux premiers postulats sont en général vérifiés (Aitken, 1985). Des variations dans le débit de la radiation environnementale sont connues, mais jusqu'à maintenant, on a considéré que les erreurs sur la mesure de l'âge, entraînées par le déséquilibre radioactif, par exemple, sont généralement assez faibles ou peuvent être corrigées. Le troisième postulat, par contre, est difficilement vérifiable. Le problème bien connu de l'*anomalous fading* représente une anomalie par rapport à ce postulat au sens où ce processus semble résulter d'une désexcitation des charges piégées, (1) soit à travers le puits de potentiel localisé par des processus non thermiques liés à l'effet tunnel (Visocekas *et al.*, 1994 ; Spooner, 1993), (2) soit par des transitions localisées (Templer, 1986). Ce processus peut donc être vu comme une fuite, non mesurable, dans l'échantillon naturel de charges qui résulte en une sous-estimation de la paléodose.

D'une autre façon, une remise à zéro incomplète laissera une certaine proportion héritée de charges à l'intérieur des pièges qui s'ajoutera aux charges piégées après l'événement à dater, ce qui conduira à une surestimation de la paléodose. C'est cet aspect qui est développé ici.

Dans le contexte de l'application de la méthode aux sédiments, nous allons tenter de visualiser trois états électroniques spécifiques correspondant à des étapes importantes du cycle sédimentaire (fig. 3). Dans le cas des minéraux de la région source, des feldspaths ayant cristallisé dans un batholite granitique précambrien, par exemple, seront, en termes de luminescence naturelle, saturés, en ce sens que la densité des électrons piégés ne peut être augmentée par irradiation naturelle ou artificielle. On sait que ce niveau est atteint après environ un million d'années ou moins, ce qui explique que la méthode de datation ne peut s'appliquer à des événements plus vieux qu'environ 500 ka (Mejdahl, 1989). Ainsi, la thermoluminescence et la photoluminescence latente de ces minéraux sont extrêmement élevées (fig. 3a). Durant le transport sédimentaire, l'énergie solaire interagit avec les charges initialement piégées dans les défauts cristallins et le cortège de charges photosensibles est ainsi libéré. Il est important de noter qu'une population de charges non photosensibles (*hard to bleach component*) ne peut être libérée lors de l'exposition à la lumière solaire. Celle-ci est responsable de la production d'un faible niveau de thermoluminescence, même dans le cas de sédiments bien remis à zéro (fig. 3b). L'application des méthodes de thermoluminescence, comme le lessivage partiel (*Partial-bleach dating technique*, Wintle et Huntley, 1980), n'est alors possible que dans le cas où le

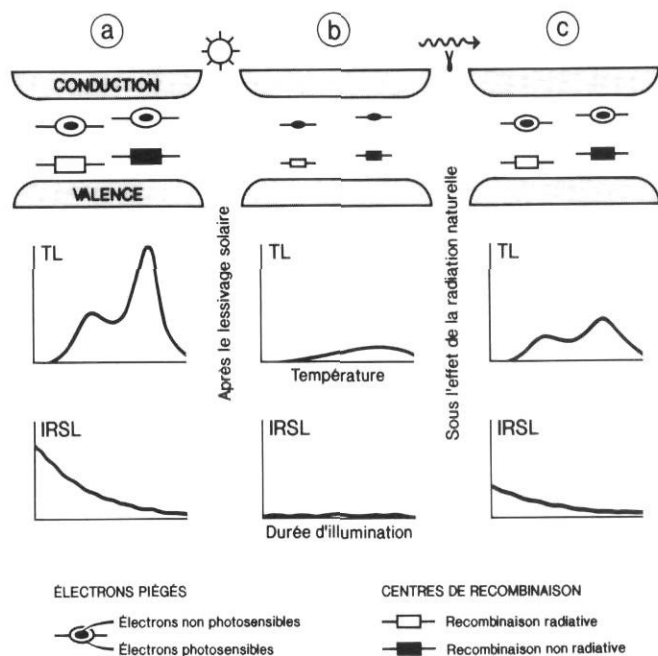


FIGURE 3. Représentation de l'état électronique dans des feldspaths, à trois étapes classiques du cycle sédimentaire. a) Dans les minéraux de la région source, les défauts de la structure cristalline situés près de la bande de conduction sont théoriquement saturés par des électrons dont certains sont photosensibles. La recombinaison lors de la stimulation thermique (TL) ou optique (IRSL) en laboratoire, se fait à des centres qui peuvent, dans une certaine proportion, être radiatifs, c'est-à-dire avec production de lumière. b) Lors de l'exposition à la lumière solaire, les charges photosensibles sont libérées dans l'environnement et le minéral est « remis à zéro ». Une recombinaison radiative ne peut être produite alors que par une stimulation thermique (TL). c) Après un enfouissement d'une certaine durée, les nouveaux électrons photosensibles piégés deviendront la source d'émission de luminescence sous stimulation optique. Cette luminescence sera fonction du débit de dose naturelle ambiante et du temps écoulé.

Schematic representation of the electronic state in natural minerals for the classical three stages of the sedimentary cycle. a) In minerals of the source area, defects localized close to the conduction band are theoretically saturated by electrons, some of which are photosensitive. Upon thermal (TL) or optical (IRSL) laboratory stimulation, recombination will proceed, some of which being radiative, i.e. accompanied with emission of light. b) In the natural environment, exposure to sunlight frees the photosensitive electrons and the mineral is reset to zero with respect to the luminescence method. Radiative recombination can only result through thermal stimulation (TL). c) During burial, new photosensitive electrons can be trapped and these will be the source of optically stimulated luminescence. This luminescence intensity will be proportional to the natural radiation dose-rate and to time elapsed since burial.

niveau résiduel hérité au moment de la sédimentation peut être déterminé. Compte tenu des difficultés qui se manifestent lors de la datation de sédiments mal remis à zéro, une autre méthode de stimulation a été proposée, celle de la stimulation optique (Huntley *et al.*, 1985). Son grand avantage par rapport à la méthode de la thermoluminescence réside dans le fait que la photoluminescence de grains de feldspaths de dunes modernes est nul (fig. 3b). En d'autres termes, pour un sédiment d'âge zéro, la photoluminescence est à toutes fins pratiques égale à zéro. Finalement, le troisième état élec-

tronique est montré à la figure 3c où de nouvelles charges photosensibles, postsédimentaires, ont été piégées, à la suite de l'enfouissement sédimentaire et de l'exposition à l'irradiation ambiante, pour une période géologique relativement courte, de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années. C'est cet enfouissement sédimentaire que l'on cherche à dater. Rappelons que le signal de thermoluminescence a deux composantes : (1) une composante correspondant à la population de charges non photosensibles, et (2) une composante de charges photosensibles. Cette dernière population est directement mesurée lors de la stimulation optique. C'est ce signal qui est utilisé pour estimer l'âge « optique » du sédiment (*optical date* de la littérature anglaise).

LE PROBLÈME DE LA REMISE À ZÉRO DANS LES MILIEUX SÉDIMENTAIRES

Lorsqu'un sédiment est mal remis à zéro, le signal de luminescence (TL et IRSL) est mixte, c'est-à-dire qu'il est composé d'une portion héritée et d'une autre postsédimentaire. Dans ce cas, la mesure de la paléodose résultera en une surestimation de l'âge. La recherche de solutions à ce problème se fonde sur deux postulats extrêmes. On peut soit considérer que 1) tous les minéraux d'un cortège sédimentaire sont partiellement remis à zéro, ou 2) que certains minéraux seulement sont remis complètement à zéro, les autres ne l'étant pas du tout. Le deuxième cas est illustré sur la figure 4. Prenant pour exemple un milieu glaciolacustre littoral, on suppose que les plages sont constituées d'un mélange de grains dont une partie seulement a été exposée à la lumière solaire et complètement lessivée.

Dans l'éventualité où nous pourrions mesurer la photoluminescence d'un échantillon de grains de feldspaths au moment de la sédimentation (temps zéro ; fig. 4a), la luminescence émise (L) serait égale à L_u (L_u : Luminescence from unbleached grains), laquelle résulterait de recombinaisons engendrées dans les grains non remis à zéro. Si nous échantillonnons ces sédiments 10 000 ans plus tard (fig. 4b), la luminescence latente observée serait alors augmentée d'une valeur représentant la luminescence produite par le repeuplement des pièges à l'intérieur des grains initialement remis à zéro. Un tel sédiment aurait alors une luminescence latente L égale à $L_u + L_b$ (L_b : Luminescence from bleached grains). Les mesures en laboratoire doivent alors viser à isoler le signal L_b qui est proportionnel à la période écoulée depuis la sédimentation.

La mesure de la paléodose en laboratoire implique une calibration de la sensibilité du signal de luminescence par rapport à la dose (Aitken, 1985). Cette sensibilité est estimée en soumettant des parties aliquotes de l'échantillon à des doses connues d'irradiation artificielle. À notre laboratoire, nous utilisons une source calibrée de photons gamma, produits par une source de ^{60}Co . Dans le cas d'une partie aliquote constituée d'une multitude de grains de feldspaths potassiques dont une portion n'a pas été remise à zéro, la croissance du signal avec la dose induite en laboratoire sera le résultat de la somme des contributions des deux populations de grains, soit celle des grains non remis à zéro et celle

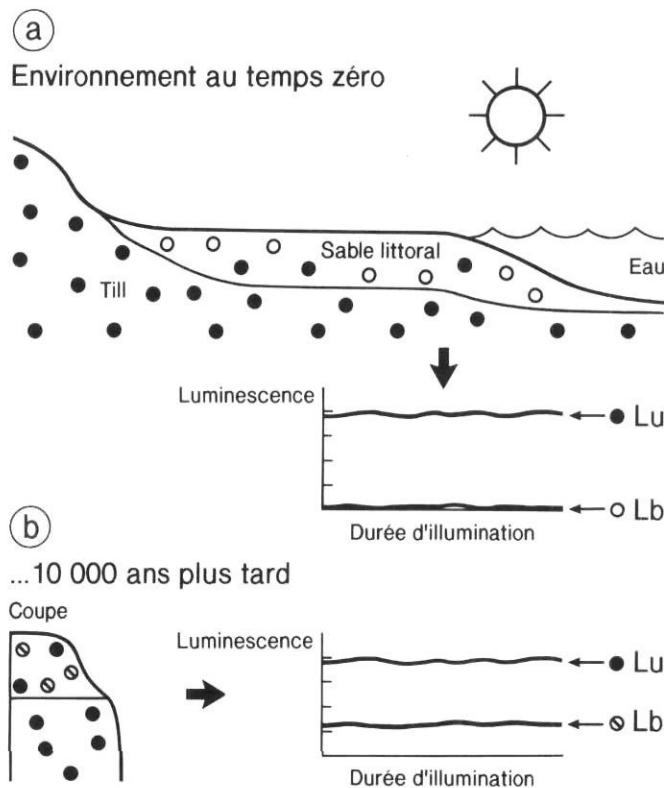


FIGURE 4. a) Représentation d'un littoral actif où la plage est constituée de sédiments glaciaires remaniés. b) La situation 10 000 ans plus tard après émergence de la succession sédimentaire. Les cercles pleins représentent des grains monominéraliques, non remis à zéro, dont la photoluminescence latente (L_u) est au niveau de saturation. Les cercles vides représentent, eux, des grains complètement remis à zéro, dont la photoluminescence (L_b) au temps zéro est pratiquement nulle, et les cercles à barre transversale, des grains originalement bien remis à zéro mais qui ont reçu une dose après enfouissement.

a) Representation of an active beach composed of reworked glacial sediments. b) The same beach sediments 10 000 years later, after emergence. Solid circles are unbleached monomineralic grains, for which latent photoluminescence (L_u) is near saturation; open circles are bleached grains for which latent photoluminescence at time zero (L_b) is close to naught; slashed circles represent well-bleached grains which have received a post-burial dose.

des grains effectivement remis à zéro. Comme l'illustre la figure 5, la croissance du signal représentera une mesure apparente puisque la croissance des grains non remis à zéro, à saturation ou presque, dominera le signal mesuré. Il faut signaler ici que contrairement au modèle classique décrit plus haut, l'irradiation artificielle semble toujours provoquer une augmentation du signal de luminescence, même si les minéraux ont atteint leur niveau de saturation naturelle. Ce manque par rapport à un principe de base en luminescence est lié à la présence d'états métastables dans le minéral, probablement activés par l'irradiation artificielle. Ce problème est lié au phénomène de l'*anomalous fading*. Les grains de faible paléodose sont plus sensibles à l'irradiation, ce qui implique que la croissance d'un échantillon multigrains sera quand même plus forte que dans le cas de grains d'âge infini. Le résultat obtenu sera une paléodose apparente, plus élevée que la dose réelle et « finie ». L'âge mesuré sera plus élevé

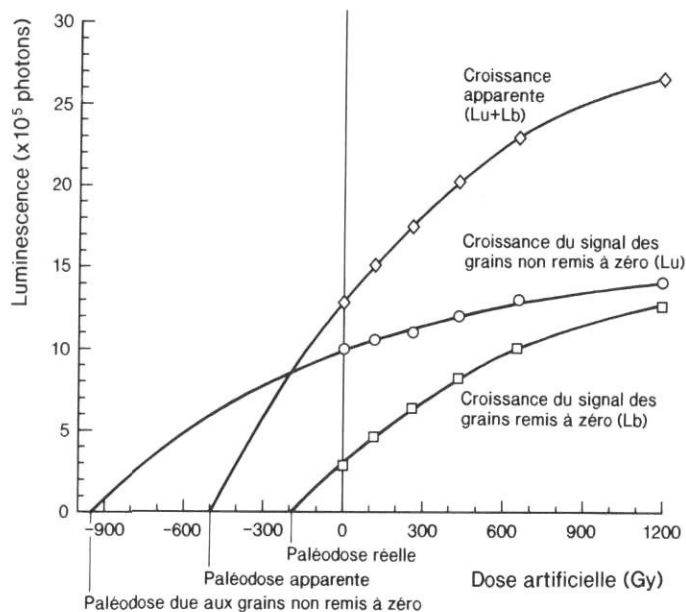


FIGURE 5. Modèle théorique montrant une série de courbes de croissance de luminescence sous l'effet de la radiation artificielle induite en laboratoire pour des sédiments mal remis à zéro. La courbe supérieure représente la croissance apparente de multiples grains dont certains ont été lessivés au temps zéro et d'autres sont pratiquement saturés. Notez la similitude entre la paléodose apparente et la paléodose réelle.

A theoretical model showing a series of luminescence growth curves with applied artificial dose in the case of a poorly-bleached sediment. The upper curve represents an apparent growth that would be exhibited by a sample composed of unbleached and well-bleached grains. Note the similarity of both the apparent and true paleodoses.

que l'âge réel, et cette surestimation de l'âge sera impressionnante dans des milieux où les grains auront été mal remis à zéro. L'âge obtenu est donc un âge « apparent ». L'unique espoir de mesurer un âge apparent se rapprochant de l'âge réel est d'isoler le signal émis par les grains remis à zéro. La section suivante présente une nouvelle méthode qui vise à isoler ce signal.

L'ANALYSE DES MONOGRANS EN PHOTOLUMINESCENCE

Cette méthode fait appel à une nouvelle technique élaborée par Duller (1991, 1992) qui permet la mesure de paléodoses à partir d'une seule portion aliquote composée de multigrains. Cette méthode a été étendue à des monograins de feldspaths par Lamothe *et al.* (1994) qui ont ainsi obtenu, pour la première fois, des dates sur grains individuels monominéraliques. Cette nouvelle méthode a été élaborée en utilisant un sédiment de la Mer de Champlain échantillonné à la gravière de Saint-Nicolas (LaSalle, 1989).

La mesure de paléodoses à partir de grains individuels sera expliquée plus loin. Ici, on explique comment l'analyse monograin permet de quantifier le niveau de remise à zéro de minéraux luminescents. Ce type d'analyse sera ensuite proposé comme une étape préliminaire dans l'ensemble du protocole expérimental nécessaire à la production d'une date

en photoluminescence. Un paramètre physique est élaboré et celui-ci est proposé comme critère potentiel d'admissibilité d'un échantillon dans le cadre de programmes de datation par photoluminescence.

La figure 6 donne un exemple de la variabilité du signal de photoluminescence (infrarouge) de 120 grains de feldspaths de 500 à 1000 μm , d'un échantillon de sables coquilliers prélevé à la gravière de Saint-Nicolas. Les signaux mesurés sont très variables, mais il semble que la majorité des grains (90 %) montrent des niveaux de luminescence naturelle inférieurs à 10^5 photons (signal intégré sur 80 msec de stimulation; voir Lamothe *et al.*, 1994, pour les détails expérimentaux). D'autres grains ont des niveaux de luminescence naturelle très élevés, un de ceux-ci émettant environ 20 % de la somme de la luminescence intégrée à partir des 120 grains à l'étude. Des mesures effectuées sur des grains provenant d'un autre échantillon de la Mer de Champlain prélevé à quelques kilomètres de Deschaillons révèlent une variabilité équivalente. Cet échantillon a aussi été daté à plus de 65 ka (échantillon MCD, Balescu et Lamothe, 1994) bien que son âge réel soit de l'ordre de 11 ka.

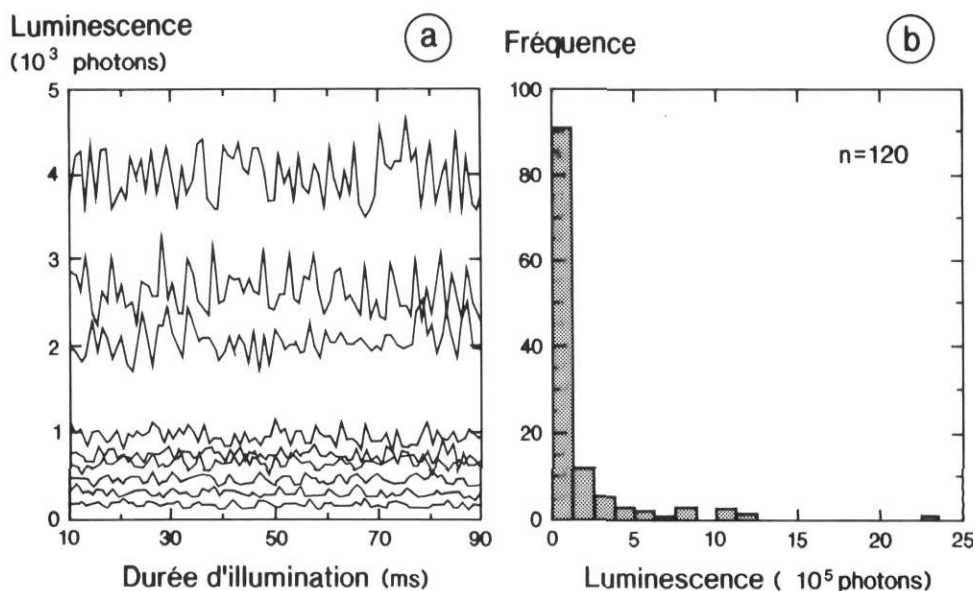
La variabilité du signal révélée par cette expérimentation résulte (1) de la sensibilité à la radiation intrinsèque dans les grains observés, c'est-à-dire que pour une même dose reçue, certains grains émettent plus de lumière que d'autres sous une même stimulation optique, en raison d'une densité plus élevée de centres de recombinaison radiatifs, et (2) de paléodoses différentes, selon le degré de remise à zéro de ces grains lors de la sédimentation. Afin d'isoler la deuxième variable, l'expérience suivante a été réalisée. Cette expérience profite du fait que les signaux de luminescence résultant d'une brève illumination ne modifient pas la densité des charges piégées puisqu'il n'y a aucune évidence de décroissance du signal (fig. 6a). Il est donc possible d'irradier ces mêmes grains et de mesurer de nouveau le niveau accru de luminescence, phénomène mis en évidence par les travaux de Duller (1992). Le signal est alors la somme résultant de la

paléodose naturelle et de la dose artificielle induite (L_{N+Y} ; fig. 7). Avant la mesure du deuxième signal, il faut cependant préchauffer l'échantillon (Li, 1991), afin d'isoler la fraction stable de la population de charges, ce qui entraîne une correction qui sera expliquée plus loin (Duller, 1991). Cette correction n'a pas été effectuée à cette étape de l'expérimentation puisqu'elle est considérée comme étant identique pour chaque grain étudié. Comme l'illustre la figure 7, les grains non remis à zéro, considérés comme presque saturés, émettront un signal équivalent au signal original après l'irradiation artificielle. En d'autres termes, le rapport L_{N+Y}/L_N devrait être proche de l'unité. Par contre, les grains remis à zéro et qui ont une faible paléodose accumulée devraient être caractérisés par un rapport beaucoup plus élevé. Un rapport des intensités $R = L_{N+Y}/L_N$ est donc introduit, R_i représentant une évaluation semi-quantitative de la paléodose reçue par les grains individuels. Ce rapport permet d'évaluer l'homogénéité de l'échantillon analysé.

Afin de vérifier l'applicabilité de cette mesure, des échantillons provenant de milieux sédimentaires différents ont été étudiés. Dans le but d'éliminer la variable temps, des échantillons d'âge équivalent ont été prélevés à la gravière de Saint-Césaire, située à quelques kilomètres à l'est de Montréal. La stratigraphie des sédiments quaternaires mis au jour dans cette gravière a été décrite par LaSalle (1982) et De Vernal *et al.* (1989). Des échantillons de sables fluvioglaciaires et marins ont été prélevés et des grains de feldspaths potassiques de la taille de 500 à 1000 μm ont été isolés selon les méthodes usuelles. L'âge des sédiments varie entre 13 et 9 ka. À toutes fins pratiques, nous pouvons considérer ces sédiments comme étant contemporains puisqu'ils ont été mis en place lors de la déglaciation. Pour fins de comparaison entre différents milieux, des grains minéraux de 88 à 300 μm ont été isolés à partir de sables d'origine éolienne, fossilisés dans de la glace enfouie de la région de Crumbling Point (Summer Island), à la limite septentrionale du delta du Mackenzie (Murton et French, 1994). Ces sables ont été datés par IRSL à ca 13-14 ka (Lamothe *et al.*, en préparation). Des

FIGURE 6. a) Signal de luminescence sous une brève stimulation optique de grains de feldspaths extraits de l'échantillon de Saint-Nicolas (SN); b) histogramme des intensités du même échantillon. Noter que quelques grains ont des intensités supérieures à 10^5 photons. La luminescence de ces minéraux dominera le signal d'un échantillon composé de multiples grains.

a) Luminescence signal upon a short shine for feldspar extracted from the Saint-Nicolas sample (SN); b) histogram of luminescence intensities for the same sample. Note that some grains have light intensities higher than 10^5 photons. Luminescence from these minerals will dominate the luminescence signal of a sample composed of multiple grains.



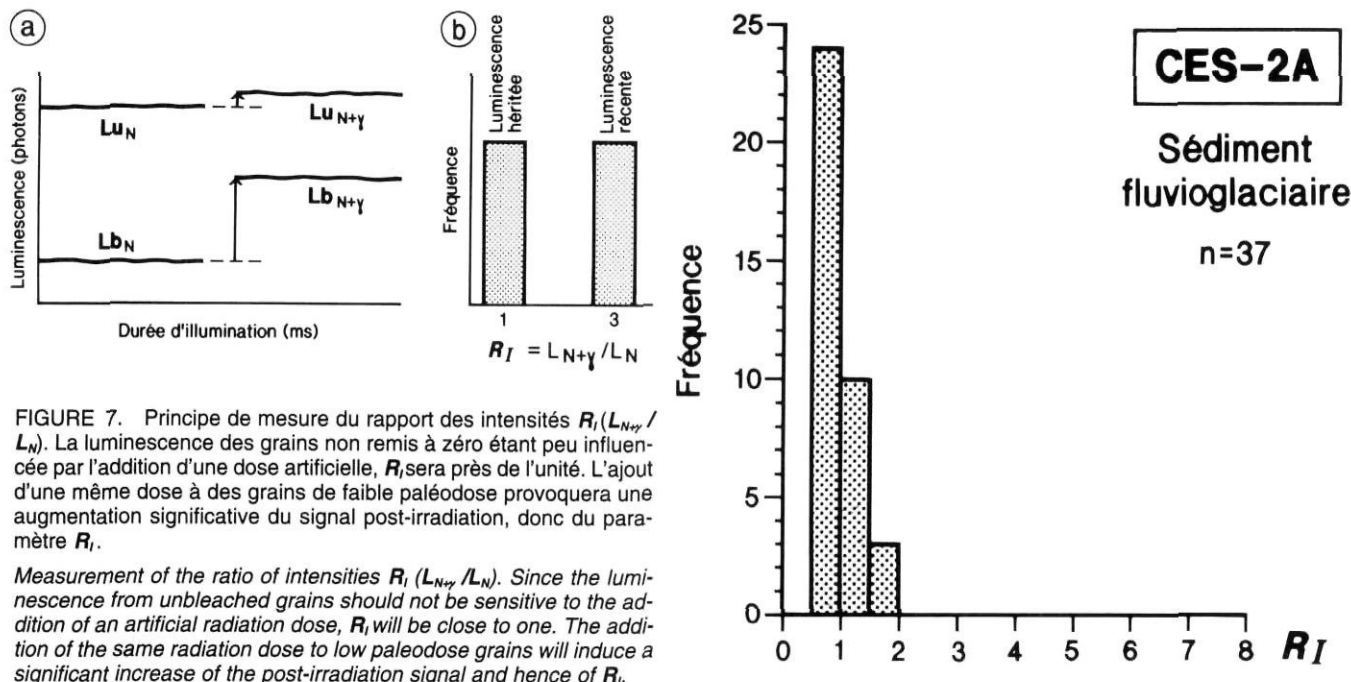


FIGURE 7. Principe de mesure du rapport des intensités $R_I (L_{N+Y} / L_N)$. La luminescence des grains non remis à zéro étant peu influencée par l'addition d'une dose artificielle, R_I sera près de l'unité. L'ajout d'une même dose à des grains de faible paléodose provoquera une augmentation significative du signal post-irradiation, donc du paramètre R_I .

Measurement of the ratio of intensities $R_I (L_{N+Y} / L_N)$. Since the luminescence from unbleached grains should not be sensitive to the addition of an artificial radiation dose, R_I will be close to one. The addition of the same radiation dose to low paleodose grains will induce a significant increase of the post-irradiation signal and hence of R_I .

mesures ont été réalisées sur plusieurs autres échantillons faisant partie de programmes de datation en cours d'étude au laboratoire ; les résultats seront présentés dans une publication ultérieure.

La distribution des valeurs de R_I mesurées à partir de ces trois échantillons est présentée à la figure 8. Les rapports obtenus pour des feldspaths isolés à partir de l'unité fluvioglaciaire rencontrée à la base de la séquence de Saint-Césaire (fig. 8 ; CES-2A) sont relativement bien regroupés autour d'une valeur avoisinant l'unité. La distribution est fortement leptokurtique, ce qui indique bien que l'ensemble des grains ont une même évolution sédimentaire. Essentiellement, ces grains ne sont pas sensibles à une irradiation subséquente et n'ont donc pas été remis à zéro. La présence de grains dont R_I est près de l'unité semble indiquer qu'un tel échantillon ne peut être daté par les méthodes usuelles de photoluminescence. L'échantillon de sables éoliens de Crumbling Point est constitué uniquement de grains de R_I supérieur à 1,5-2. Il est intéressant de noter que (1) tous les grains semblent avoir été bien remis à zéro et que (2) deux modes sont individualisés. La luminescence de ces deux populations de grains compte pour environ 80 % du signal luminescent total.

L'échantillon prélevé dans le faciès subtidal de la Mer de Champlain (CES-5) montre une distribution à tendance platykurtique (fig. 8a). Certains grains montrent des valeurs de R_I avoisinant l'unité, alors que d'autres ont été fortement influencés par l'ajout de la dose artificielle, ce même rapport atteignant alors des valeurs se rapprochant de 2 à 4. Cette distribution indique que la population de grains luminescents de l'échantillon est composée d'un mode de grains non remis à zéro (avec $R_I \leq 1,5$) et d'un autre probablement bien remis à zéro. La conséquence immédiate est que la croissance de la luminescence de portions aliquotes constituées de multiples grains sera fortement influencée par la présence des grains mal remis à zéro (fig. 5). Cette conclusion est cor-

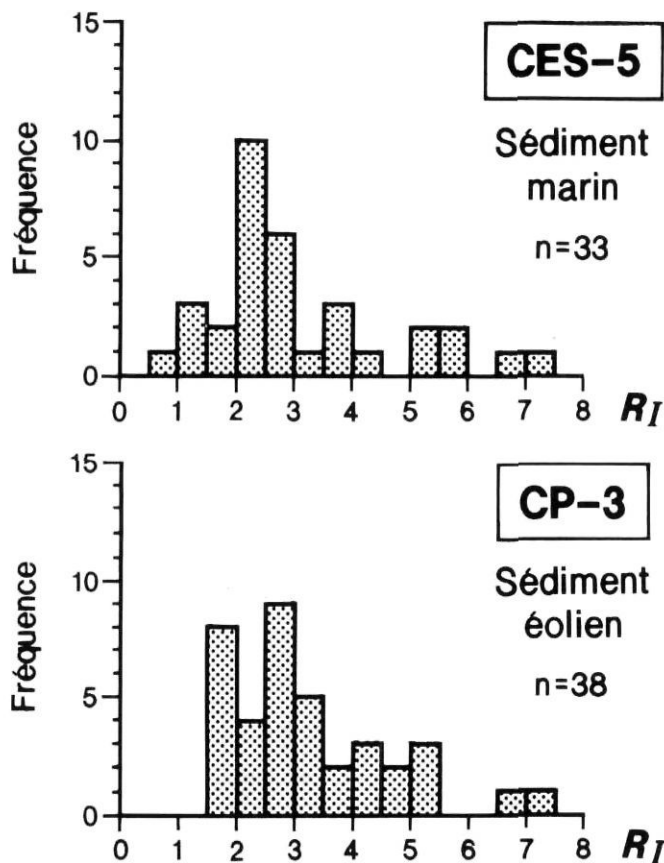


FIGURE 8. Histogrammes des valeurs R_I mesurées pour des sédiments fluvioglaciaires, marins et éoliens, la dose induite étant de 50 Gy. Les échantillons CES proviennent de la gravière de Saint-Césaire (Québec) et l'échantillon CP de Crumbling Point (T.N.-O.).

Histograms of R_I values measured on fluvioglacial, marine, and eolian sediments, the dose induced is 50 Gy. Samples CES are from the Saint-Césaire gravel pit (Québec) and sample CP is from Crumbling Point (N.W.T.).

roborée par la mesure de la paléodose de CES-5, qui est de l'ordre de 130 Gy, ce qui correspond à un âge apparent sur-estimé de ~40-45 ka.

Comparativement à la figure 7 où on indique que la distribution des R_f devrait montrer deux populations isolées du point de vue statistique, les mesures de la figure 8 révèlent que la distribution observée est relativement plus étalée et ce, même pour un sédiment éolien. Deux processus peuvent être évoqués pour expliquer ce phénomène. Premièrement, la paléodose des grains individuels de cette taille est dépendante en grande partie de la dose interne (jusqu'à 50 % dans le cas de grains de 1000 μm ; Mejdahl, 1983). L'abondance de potassium dans les grains individuels commande une bonne partie de cette dose interne. Par conséquent, R_f peut être dépendant de la variabilité de la composition des feldspaths étudiés. En particulier, les techniques de séparation minéralogique qui permettent l'extraction de feldspaths potassiques utilisent un liquide (Na-polytungstate) dont la densité spécifique est ajustée à 2,58. Il a été vérifié maintes fois qu'une séparation densimétrique peut difficilement être parfaite et, en particulier, que certains plagioclases sodiques (par exemple l'albite) peuvent avoir des densités spécifiques du même ordre que celle des feldspaths potassiques. Cette « contamination » de l'échantillon potassique peut expliquer une partie de l'étalement observé. Un deuxième facteur doit aussi être considéré, soit celui de l'*anomalous fading*. Étant donné l'âge des sédiments CES-5 et CP3 et la paléodose réelle probable de l'ordre de 30-40 Gy, l'ajout d'une dose de 50 Gy à ces grains, même avant la correction de préchauffe, ne devrait pas augmenter le niveau de luminescence d'un facteur très différent de 2. Pour certains grains, il semble que la paléodose soit anormalement faible ($R_f > 3$), ce qui laisse croire que la densité de charges photosensibles dans ces grains a été modifiée par le phénomène appelé *anomalous fading*. Quoiqu'il en soit, l'analyse monograin présentée ici démontre la complexité du signal de luminescence dont l'origine doit être attribuée à la diversité des mécanismes de production de la lumière dans les cristaux naturels. L'examen des mesures de R_f obtenues à partir de trois échantillons provenant de sédiments d'âge équivalent indique que la technique employée pourra être éventuellement utilisée comme un indicateur de l'intensité de la remise à zéro, indépendamment de toute autre méthode de datation relative ou absolue. Pour le moment, il semble que le domaine d'application de cette méthode soit limité aux échantillons dont la paléodose est relativement faible, le paramètre de sensibilité à l'irradiation pour des échantillons plus anciens devant être évalué par régénération du signal. Cette partie de l'étude sera publiée plus tard.

MESURE DE LA PALÉODOSE PAR LA TECHNIQUE DES MONOGRANS

Duller (1992) a récemment mis au point une méthode permettant de mesurer la paléodose d'un sédiment à partir d'une seule portion aliquote. Cette méthode a été appliquée sur des portions aliquotes composées de grains multiples, et les paléodoses ainsi obtenues étaient en général équivalentes à celles mesurées selon les méthodes usuelles de dose addi-

tive (Aitken, 1985). L'avantage de cette méthode réside dans la plus faible marge d'erreur dans le calcul de la paléodose puisque l'expérimentateur utilise le même échantillon. Lamothe *et al.* (1994) ont étendu l'applicabilité de cette méthode à des grains individuels de feldspaths. C'est en fait à partir de cette étude que s'est révélé le potentiel de l'analyse monograin présentée ci-haut.

Le principe de la méthode du monodisque est le suivant. Étant donné qu'une brève illumination par des photons infrarouges ne modifie pas la densité des charges photosensibles d'un minéral, une telle mesure peut être effectuée à partir d'un même échantillon assujéti successivement à des doses d'irradiation artificielle croissantes. Après quatre ou cinq cycles d'irradiation et de lecture, une courbe de croissance de la luminescence peut être tracée. Étant donné qu'à chacune des étapes d'irradiation, une certaine proportion de charges instables est présente dans l'échantillon, ce dernier doit être préchauffé avant la mesure de la luminescence. Cette préchauffe de l'ordre de 220°C pendant 10 minutes (Li, 1991) élimine ces charges instables mais a aussi l'effet d'éroder thermiquement une partie du signal stable. L'effet de plusieurs cycles de préchauffe sur le signal naturel est représenté à la figure 9. Afin de corriger cette perte de signal, la diminution de luminescence par suite de la préchauffe est ajoutée au niveau mesuré. La correction utilisée ici est celle dite de la

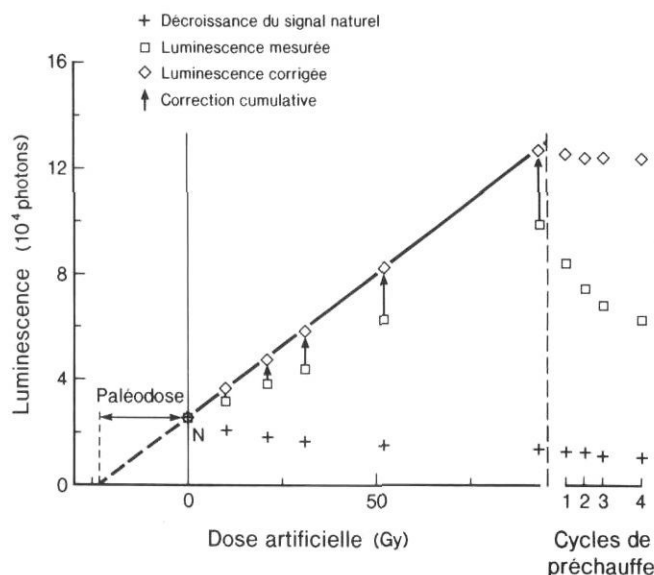


FIGURE 9. Principes de la méthode du monodisque (modifié de Duller, 1991). Les carrés représentent les intensités mesurées après chaque cycle d'irradiation/préchauffe. Les losanges résultent d'une correction du signal émis, fondée sur l'observation selon laquelle chaque cycle de préchauffe érode une partie du signal stable. Un exemple de la diminution du signal par la préchauffe est montré pour l'échantillon à son état naturel (symbole +). La paléodose est extrapolée à partir des valeurs corrigées.

Principles of the single aliquot method (modified from Duller, 1991). Squares represent the measured intensities after each irradiation/preheat cycle. The diamonds are corrected luminescence intensities, based on the fact that each preheat erodes a fraction of the stable signal. An example of such decrease in luminescence intensity is shown for a natural sample (symbol +). The paleodose is extrapolated from the corrected intensities.

luminescence (Duller, 1991). Dans le cas de sédiments plus anciens, Duller (1992) a mis au point une autre correction dite de sensibilité. Ces corrections ne sont pas expliquées en détail dans le cadre de cet article. Il suffit de savoir que ces corrections sont cumulatives, c'est-à-dire qu'à chacune des étapes de croissance du signal après l'irradiation, celui-ci est corrigé en fonction des facteurs de décroissance des signaux naturels et induits. Afin de s'assurer que la correction soit valide, des préchauffes successives sont effectuées après l'ajout de la dernière dose et la correction cumulative doit se traduire en l'émission d'un signal constant (portion de droite de la fig. 9).

L'échantillon prélevé à Saint-Nicolas (SN) a été utilisé pour tester la méthode et les résultats de cette expérience ont été publiés par Lamothe *et al.* (1994). Après la mesure du signal naturel de 120 grains (fig. 6), quinze de ces grains ont été choisis parmi toute la gamme des intensités observées. Des paléodoses ont été mesurées en utilisant la méthode du monodisque appliquée à des grains individuels de feldspaths. Comme l'illustre la figure 10, la croissance de ces grains est extrêmement variable, à forte pente pour les grains de faible intensité naturelle originale et à pente faible pour les grains qui montraient originellement une intensité naturelle élevée. Ainsi, les grains de faible intensité ont des paléodoses de l'ordre de 25-30 Gy. Étant donné que les doses annuelles pour ces grains sont de l'ordre de 4.5 Gy.k^{-1} , les âges apparents obtenus sont d'environ 6 ka. Les grains de haute intensité ont des paléodoses de l'ordre de 100 à 300 Gy et des âges apparents de 25 à 80 ka. La distribution des âges obtenus par cette méthode apparaît à la figure 11. Cette distribution a été déterminée en utilisant un programme élaboré par Venkatesan et Ramesh (1993), méthode qui tient compte de la marge d'erreur associée à chaque détermination.

L'expérience menée sur ces grains a été reproduite sur des grains monominéraux d'une arkose chauffée dans un foyer préhistorique daté à environ 2.5 ka et sur d'autres feldspaths isolés à partir de l'impactite du cratère du Nouveau-Québec, datée à *ca* 1,4 Ma (Auclair et Lamothe, 1994). Peu importe l'âge des échantillons testés, des âges optiques ont pu être obtenus sur des monograins, ce qui démontre le potentiel élevé de la méthode. Cependant, dans chacun des cas, les âges obtenus sont systématiquement de 25 à 35 % plus jeunes que l'âge réel de l'échantillon. Deux facteurs sont susceptibles d'expliquer ces sous-estimations. Malgré le potentiel de la méthode, démontré ici et aussi dans les travaux originaux de Duller (1992), les nombreuses manipulations (préchauffe, irradiation, illumination,...) auxquelles est assujéti un grain minéral dans le cours de la mesure de la paléodose, peuvent entraîner des changements non détectables de sensibilité. On n'a pas encore démontré à ce stade-ci que la correction de préchauffe est valable et universelle. Ce facteur est lié à la méthode de mesure et peut éventuellement être identifié et corrigé. Un deuxième facteur susceptible d'être responsable des sous-estimations observées est le fait que la mesure de la densité naturelle des charges photosensibles soit encore une fois limitée par le phénomène de l'*anomalous fading*, un processus de désexcitation anormal par « effet tunnel » (Visocekas *et al.*, 1994) ou par le jeu de transitions

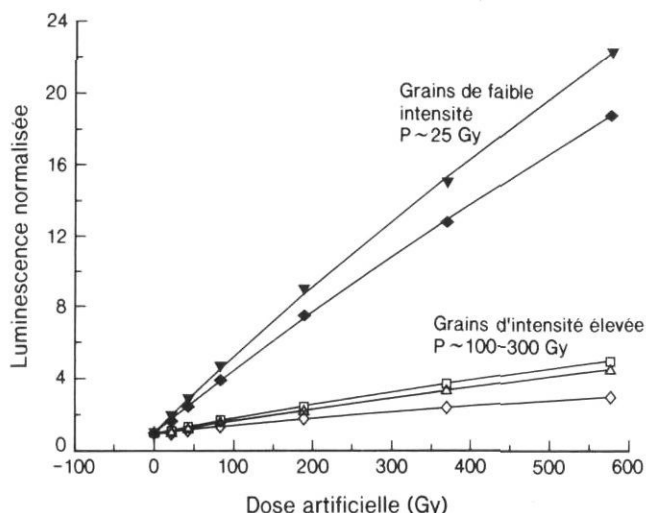


FIGURE 10. Exemple de mesures de paléodoses à partir de grains individuels de feldspaths extraits de l'échantillon de Saint-Nicolas (SN). Les intensités de luminescence sont normalisées par rapport au signal naturel. Les courbes de croissance à forte pente sont caractéristiques de grains bien remis à zéro en milieu naturel (au temps zéro, $L = L_0 = 0$).

Examples of paleodoses measured on single feldspar grains extracted from the Saint-Nicolas sample (SN). The luminescence intensities are normalized to the natural signal. Steep slope growth curves are typically from grains that had been well-bleached in the natural environment (at time zero, $L = L_0 = 0$).

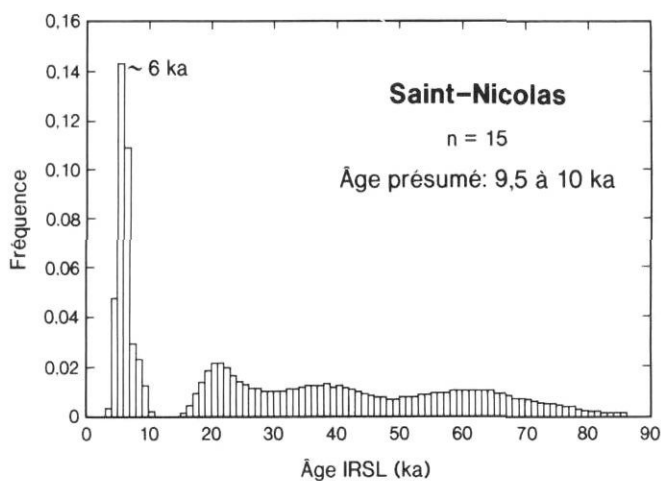


FIGURE 11. Histogramme des âges IRSL obtenus par la méthode des monograins pour l'échantillon de Saint-Nicolas (SN). L'histogramme tel que présenté tient compte de l'écart type de chacune des mesures (Venkatesan et Ramesh, 1993). L'âge du dernier événement sédimentaire correspond au mode le plus jeune et le plus intense de la distribution. La valeur de 6 ka est sous-estimée d'au moins 3 ka (LaSalle, 1989), sous-estimation probablement reliée au problème de l'*anomalous fading*.

Histogram of IRSL ages obtained on single grains for the Saint-Nicolas sample (SN). This type of histogram takes into consideration the standard deviation of each measurement (Venkatesan et Ramesh, 1993). The age of the last depositional event corresponds to the youngest and most intense mode in the distribution. The 6 ka value suggests there is a 3 ka underestimation for this sample (LaSalle, 1989). This is presumed to be the result of *anomalous fading*.

localisées (Templer, 1986). Ce facteur tire son origine d'un processus physique encore mal connu et qui fait actuellement l'objet de nombreuses études (voir Spooner, 1993).

CONCLUSION

L'application des méthodes de luminescence à la datation des sédiments apparaît comme une approche géochronologique extrêmement prometteuse. La thermoluminescence des grains sédimentaires est composée d'une fraction héritée difficilement évaluable. Cette méthode a donc été récemment supplantée par la photoluminescence qui mesure d'une façon directe la densité des charges photosensibles des minéraux des milieux sédimentaires. En fait, la source de stimulation de la luminescence utilisée en laboratoire et le processus d'exposition solaire en milieu naturel engendrent des processus physiques essentiellement identiques dans les grains datés. Cependant, l'application de cette méthode dans des milieux sédimentaires où l'exposition solaire est minimale reste problématique surtout en raison de l'intensité du signal hérité pour des échantillons composés de grains peu ou non remis à zéro.

La mise au point de l'analyse monograin permet d'envisager, pour la première fois, l'établissement de critères intrinsèques déterminant l'admissibilité d'un échantillon dans le cadre d'un programme de datation par photoluminescence. Il y a plus de dix ans, Wintle et Huntley (1982) avaient défini trois tests à être appliqués pour valider une date de thermoluminescence. On devait notamment démontrer l'applicabilité de la méthode à chacun des programmes de datation en utilisant trois échantillons d'âge connu, prélevés dans la même région ou préférablement présents dans la même succession stratigraphique que les échantillons analysés. Il s'est révélé qu'à toutes fins pratiques il était impossible de prélever des échantillons de contrôle provenant de faciès sédimentaires équivalents mais d'âges différents. De plus, les conclusions tirées de l'étude de sédiments d'âge connu ne sont pas nécessairement applicables aux autres échantillons de la séquence analysée. La technique des monograins permet de déterminer l'applicabilité de la méthode à un échantillon à partir de ses caractéristiques intrinsèques. L'élaboration de cette méthode n'est pas encore terminée mais il apparaît clairement que cette approche d'analyse ponctuelle est la voie de l'avenir. Des processus physiques tels que la variabilité des doses internes et la stabilité à long terme du signal de luminescence, devront cependant être étudiés plus en détail.

En conclusion, le signal de photoluminescence obtenu à partir d'un échantillon classique, composé d'une multitude de grains de nature et d'origine diverses, pourra très prochainement être résolu en ses multiples composantes individuelles. D'autres efforts expérimentaux seront nécessaires pour que la méthode de la photoluminescence soit reconnue comme un outil universel de datation des milieux sédimentaires récents.

REMERCIEMENTS

Cette étude a pu être réalisée grâce à un financement du programme de subventions du CRSNG. François Hardy et

Benoît Perreault, étudiants au Département des sciences de la Terre, ont réalisé une grande partie des mesures en laboratoire. Marie Auclair, agente de recherche du Département, coordonne et participe activement à l'élaboration de la méthode des monograins. Michèle Laithier a dessiné les figures illustrant l'article. Sanda Balescu, François Hardy et Marie Auclair en ont fait une lecture critique. L'évaluation constructive de Didier Miallier (Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand) et de David J. Huntley (Université Simon Fraser, Burnaby) a été grandement appréciée, les suggestions de ce dernier ayant été particulièrement utiles lors de la dernière phase de rédaction.

RÉFÉRENCES

- Aitken, M.J., 1985. Thermoluminescence dating. Academic Press, London, 359 p.
- 1994, Optical dating: A non-specialist review. *Quaternary Geochronology*, 13: 503-508.
- Auclair, M. et Lamothe, M., 1994. La datation par luminescence optique de grains individuels de feldspath: quelques exemples. 62^e congrès de l'ACFAS, Montréal, Recueil des résumés, p. 191.
- Balescu S. et Lamothe, M., 1992. The blue emission of K-feldspar coarse grains and its potential for overcoming TL age underestimation. *Quaternary Science Reviews*, 11: 45-51.
- 1993. Thermoluminescence dating of the Holsteinian marine formation of Herzele, northern France. *Journal of Quaternary Science*, 8: 117-124.
- 1994. Comparison of TL and IRSL age estimates of feldspar coarse grains from waterlain sediments. *Quaternary Geochronology*, 13: 437-444.
- Berger, G.W., 1988. Dating Quaternary events by luminescence. In D.J. Easterbrook éd., *Dating Quaternary sediments*. Geological Society of America, Special Paper 227: 13-50.
- 1994. Thermoluminescence dating of sediments older than ~100 ka. *Quaternary Geochronology*, 13: 445-455.
- Berger, G.W. et Eyles, N., 1994. Thermoluminescence chronology of Toronto-area Quaternary sediments and implications for the extent of the mid-continent ice sheet(s). *Geology*, 22: 31-34.
- Debenham, N.C., 1985. Use of the UV emissions in the TL dating of sediments. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 10: 717-724.
- deVernal, A., Goyette, C. et Rodrigues, C.G., 1989. Contribution palynostratigraphique (dinokystes, pollen et spores) à la connaissance de la mer de Champlain: coupe de Saint-Césaire, Québec. *Journal canadien des sciences de la Terre*, 26: 2450-2464.
- Duller, G.A.T., 1991. Equivalent dose determination using single aliquots. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18: 371-378.
- 1992. Luminescence chronology of raised marine terraces, South-West North Island, New Zealand. Ph.D. thesis, University of Wales, Aberystwyth, 147 p.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. et Thewalt, M.L.W., 1985. Optical dating of sediments. *Nature*, 313: 105-107.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., Thewalt, M.L.W. et Berger, G.W., 1988. Thermoluminescence spectra of some mineral samples relevant to thermoluminescence dating. *Journal of Luminescence*, 39: 123-136.
- Lamothe, M., Balescu, S. et Auclair, M. 1994. Natural IRSL intensities and apparent luminescence ages of single feldspar grains extracted from partially bleached sediments. *Radiation Measurements*, 23: 555-561.
- Lasalle, P., 1989. Stratigraphy and glacial history of the Quebec city region. *Friends of the Pleistocene 52nd Annual meeting, Field guide book*, 27-40.
- Lasalle, P., David, P.P. et Bouchard, M.A., 1982. Guidebook of 45th Annual Meeting of the Friends of Pleistocene, Drummondville - Saint-Hyacinthe, Québec, Canada. Université de Montréal.
- Li, S.-H., 1991. Removal of the thermally unstable signal in optical dating of K-feldspar. *Ancient TL*, 9: 26-29.

- Li, S.-H. et Wintle, A.G., 1992. A global view of the stability of luminescence signals from loess. *Quaternary Science Review*, 11 : 133-137.
- McKeever, S.W.S., 1985. *Thermoluminescence of solids*. Cambridge University Press.
- Mejdahl, V., 1983. Feldspar inclusion dating of ceramics and burnt stones. *PACT 9* : 351-364.
- 1989. How far back : Life times estimated from studies of feldspars of infinite ages. *In* Long and short range limits in luminescence dating, Occasional Publication 9, Research Laboratory for Archaeology and the History of Art.
- Murton, J.B. et French, H.M., 1994. Cryostructures in permafrost, Tuktoyaktuk Coastlands, Western Arctic Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31 : 737-747.
- Speit, B. et Lehman, G., 1982. Radiation Defects in Feldspars. *Physics and Chemistry of Minerals*, 8 : 77-82.
- Spooner, N.A., 1993. The validity of optical dating based on feldspar. D. Phil. thesis, University of Oxford, 207 p.
- Spooner, N.A. et Questiaux, D.G., 1989. Optical Dating - Achenheim beyond the Eemian using green and infrared stimulation. *In* Long and short range limits in luminescence dating, Occasional Publication 9, Research Laboratory for Archaeology and the History of Art.
- Templer, R.H., 1986. The localised transition model of anomalous fading. *Radiation Protection Dosimetry*, 17 : 493-497.
- Venkatesan, T.R. et Ramesh, R. 1993. Consideration of analytical uncertainties while Plotting Histograms. *Journal of Geological Society of India*, 41 : 313-317.
- Visocekas, R., Spooner, N.A. Zink, A. et Blanc, P., 1994. Tunnel afterglow, fading and infrared emission in thermoluminescence of feldspars. *Radiation Measurements*, 23 : 377-386.
- Wintle, A.G., 1993. Luminescence dating of aeolian sands : An overview. *In* K. Pye, édit., The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems. Geological Society of London, Special Publication 72 : 49-58.
- Wintle, A.G. et Huntley, D.J., 1979. Thermoluminescence dating of deep-sea ocean core. *Nature*, 279 : 710-712.
- 1980. Thermoluminescence dating of ocean sediments. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 17 : 348-360.
- 1982. Thermoluminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, 1 : 31-53.